

УДК 620.22:621.165

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ ЧАСТИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ К-1200-6,8/50

Дорофей В.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Герасимова А.Г.

Паровая конденсационная турбина К-1200-6,8/50 представляет собой одновальный пятицилиндровый агрегат, состоящий из симметричного двухпоточного цилиндра высокого давления и четырех симметричных двухпоточных цилиндров низкого давления. Конструктивная схема выполнения – «бабочка». На рисунке 1 представлен общий вид турбины К-1200-6,8/50 проекта АЭС-2006.

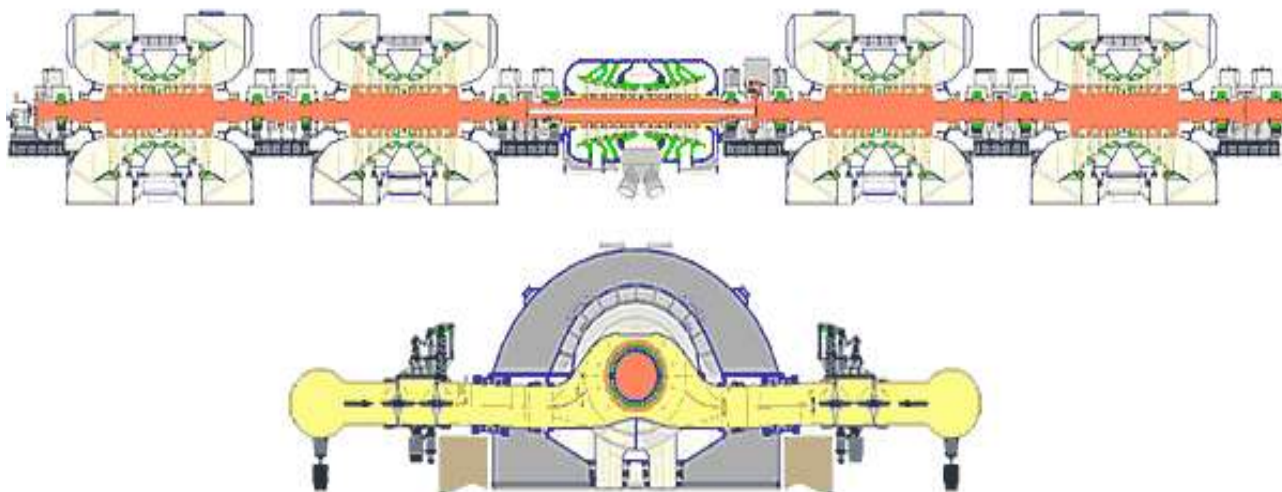


Рисунок 1. Продольный и поперечный разрезы турбины К-1200-6,8/50

Цилиндры низкого давления (ЦНД) турбины – двухпоточные и имеют наружный и внутренний корпуса, проточная часть каждого потока состоит из пяти ступеней.

В целях улучшения технических характеристик турбоустановки К-1200-6,8/50, по сравнению с достигнутыми ранее, заводом-изготовителем предусмотрен ряд конструктивных мероприятий в ЦНД применены [1]:

- направляющие лопатки 2 и 5 ступеней с тангенциальным навалом;
- патрубки с улучшенными характеристиками;
- новые конструкции и способ крепления к корпусу ЦНД концевых уплотнений.

Проточная часть ЦНД турбины К-1200-6,8/50 приведена на рисунке 2.

### Конструктивные особенности рабочих лопаток части низкого давления

Рабочие лопатки первых двух ступеней ЦНД имеют цельнофрезерованные бандажи с проволочными вставками, рабочие лопатки третьих ступеней имеют цельно фрезерованные бандажи. Рабочие лопатки четвертых и пятых ступеней

также имеют цельнофрезерованные бандажи, на лопатках установлены две проволоочные связи.

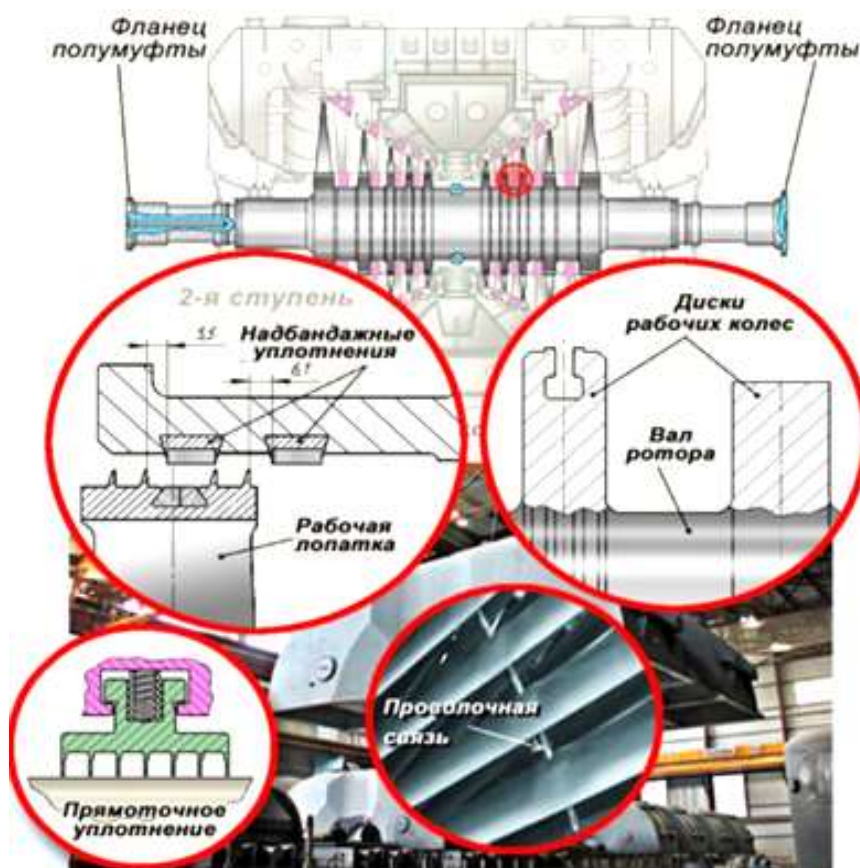


Рисунок 2. Проточная часть ЦНД турбины К-1200-6,8/50

Рабочие лопатки последней ступени цилиндра низкого давления длиной 1200 мм используются в настоящее время для быстроходных турбин.

На рисунках 3 и 4 изображены схема и фрагмент рабочей лопатки. Конструкция рабочей лопатки состоит из профильной рабочей части (пера) и хвостовика, который предназначен для крепления лопаток на диске. При этом лопатки устанавливаются в диске с равным шагом, образуя рабочие каналы. Группа лопаток, установленных на диске, крепится ленточным бандажом, в котором определенной формы и с определенным шагом под шипы выполнены отверстия. Шипы расклепывают, в результате чего лопатки на диске собраны в пакеты, увеличивая вибрационную надежность лопаток.

**Условия эксплуатации рабочих лопаток последней ступени части низкого давления турбины К-1200-6,8/50.** Рабочие лопатки эксплуатируются в трудных условиях. В процессе вращения в рабочей лопатке возникают большие центробежные силы и напряжения растяжения, стремящиеся вырвать лопатку из диска. Окружная сила, создает полезный крутящий момент на валу паровой турбины и изгибает лопатку в плоскости диска. Кроме того, лопатка может изгибаться в плоскости оси турбины под разностью давлений [2].

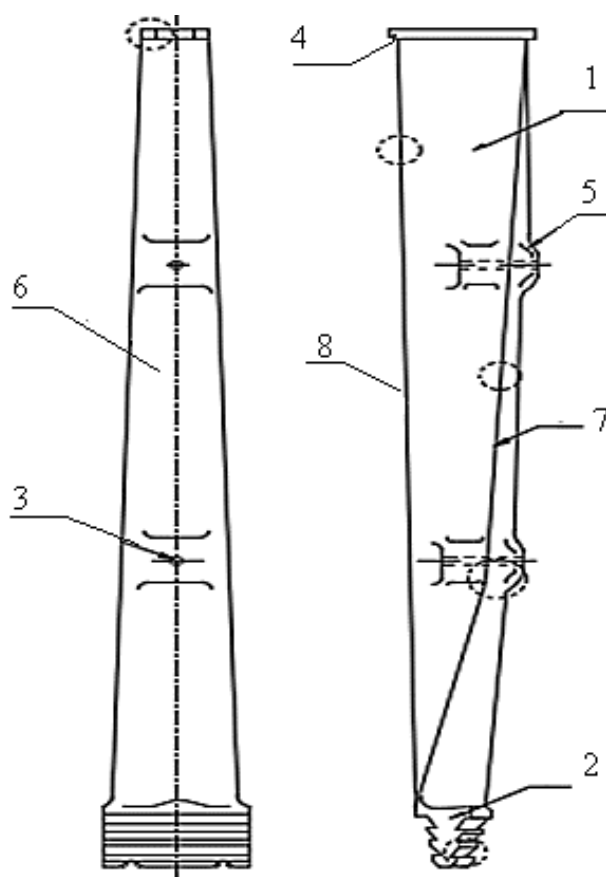


Рисунок 3. Принципиальная схема рабочей лопатки турбины К-1200-6,8/50:  
1 – рабочая часть (перо); 2 – хвостовик; 3 – отверстия под проволоочную связь;  
4 – интегральный бандаж; 5 – утолщение; 6 – профильная часть; 7 – выходная кромка;  
8 – входная кромка



Рисунок 4. Фрагменты рабочих лопаток ЦНД турбины К-1200-6,8/50

На рабочие лопатки действуют изгибающие силы, непрерывно изменяющиеся во времени из-за разных размеров проходных сечений сопловых каналов, наличия выходных кромок сопловых лопаток и др. причин, приводя к колебаниям лопаток и развитию усталостных трещин, что в итоге приводит к внезапному обрыву лопаток.

Повреждения лопаток и как следствие их разрушение происходят по следующим причинам: водяных ударов; попадания в проточную часть посторонних предметов; задеваний рабочих лопаток о детали статора; низкая статическая прочность, приводящая к обрыву рабочих лопаток, проволоочных связей и бандажей; усталости материала рабочих лопаток, вызываемой переменными напряжениями из-за вибрации рабочих лопаток; коррозии; эрозионного износа.

Наиболее опасной для рабочих лопаток, особенно последних ступеней, является эрозия, которая приводит к разрушению их поверхностей. Эрозионный износ снижает экономичность и механическую прочность рабочих лопаток, что нередко приводит к аварийным ситуациям.

Содержащиеся в паре агрессивные примеси, снижают коррозионную стойкость материала лопаток и сопротивление действию напряжений. В районе фазового перехода, происходит процесс концентрации агрессивных примесей, в первую очередь хлоридов, из-за чего в материале лопаток образуются язвы. Язвы являются концентраторами напряжений и приводят к разрушению лопаток от коррозионной усталости.

Рабочие лопатки паровой турбины, являются одной из самых дорогих и уязвимых частей турбины. Повреждения рабочих лопаток нередко приводят к аварийным ситуациям и простоем турбины.

**Классификация дефектов рабочих лопаток.** Дефекты рабочих лопаток в соответствии с ГОСТ 34497-18 [4] делят на следующие виды:

а) поверхностные дефекты (механические, эрозионный износ элементов профиля, коррозионные повреждения, технологические повреждения, поверхностные трещины);

б) внутренние дефекты (подповерхностные трещины, внутренние технологические дефекты);

в) остаточная деформация металла (нарушение геометрии и/или формы профиля);

г) нарушение крепления рабочих лопаток (повреждение, деформация заклепок и овальная вытянутость отверстий под заклепки);

Места наиболее интенсивного износа рабочих лопаток последней ступени паровой турбины К-1200-6,8/50 показаны на рисунке 5.

**Определение комплекса необходимых свойств и выбора конструкционного материала рабочих лопаток.**

Одним из основных факторов, влияющих на надежность и долговечность турбин, является правильный и обоснованный выбор конструкционных материалов.

Тяжелые условия работы рабочих лопаток турбины К-1200-6,8/50, рассмотренные выше, исключают применение для них углеродистых сталей.



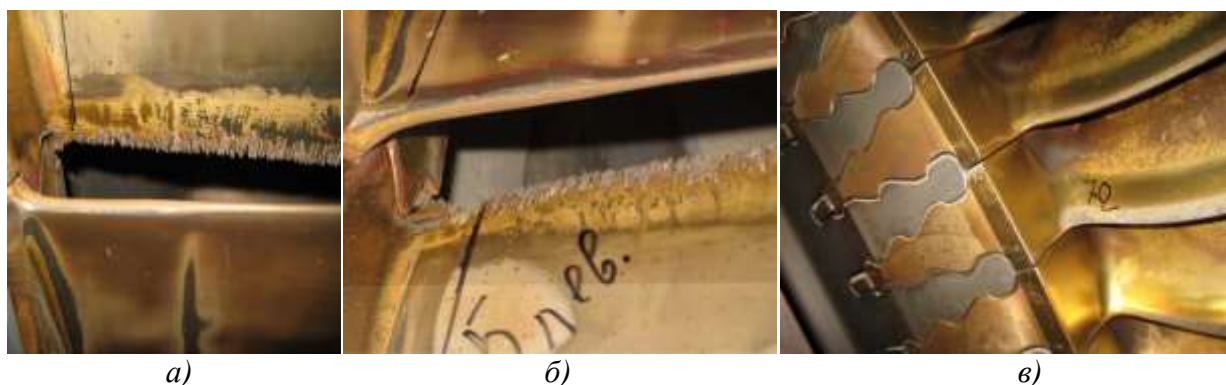


Рисунок 5. Места интенсивного износа различных зон рабочих лопаток последней ступени паровой турбины К-1200-6,8/50:

*а* – эрозионный размыв входной кромки рабочих лопаток; *б* – эрозионный размыв входной кромки в месте перехода к бандажу; *в* – эрозия выходных кромок у корня рабочей лопатки

Исходя из условий эксплуатации, основными служебными свойствами лопаток последней ступени ЦНД турбины К-1200-6,8/50 являются:

- коррозионная стойкость;
- эрозионная стойкость;
- прочность;
- износостойкость;
- надежность.

Выбор материала для рабочих лопаток, технология изготовления, режимы термообработки определяются большим количеством требований.

Материал должен обладать высокой конструкционной прочностью, включающую высокую усталостную и статическую прочность, ударную вязкость, пластичность, а также должен хорошо сопротивляться эрозии и коррозии и обладать технологичностью.

Многие из требований к материалам являются противоречивыми: высокая статическая прочность снижает пластичность, мелкозернистая структура повышает статическую прочность, но снижает жаропрочность. При разработке материалов для рабочих лопаток приходится идти на компромисс, что объясняет ограниченное количество марок сталей для рабочих лопаток и медленный прогресс в их улучшении.

При конструировании турбин большой мощности одной из важнейших задач является увеличение длины рабочих лопаток последних ступеней части низкого давления, что необходимо делать для увеличения расхода пара на турбину. Применение рабочих лопаток длиной более 1000 мм из ферритной нержавеющей стали нежелательно, т.к. приводит к резкому увеличению массы оборудования, росту центробежных нагрузок и в конечном итоге поломке лопаток.

Для сопротивления высоким нагрузкам необходимо использовать материалы с более высокой удельной прочностью по сравнению со сталями. Перспективными материалами для изготовления лопаток большой длины являются сплавы титана, удельная прочность которых в 2,0–2,5 раза выше сталей, кроме того они обладают высокой коррозионной и эрозионной

стойкостью, имеют более высокую коррозионно-усталостную прочность, а также хорошо сопротивляются хрупким разрушениям.

Применение титановых сплавов, в частности марки ВТ6, позволило создать рабочую лопатку длиной 1200 мм, обладающую высокой конструкционной прочностью. Кроме того, для повышения износостойкости проводится упрочнение поверхности лопатки и бандажа методом ионной имплантации и напылением нитрида титана.

Титановый прокат ВТ6 выпускается по ГОСТ19807-91 [5] и является одним из самых востребованных в России, а также пользуется большим спросом за рубежом. Химический состав и механические сплава ВТ6 приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1-Химический состав в % сплава ВТ6

<i>Fe</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>V</i>	<i>N</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>Zr</i>	<i>O</i>	<i>H</i>	Прочих примесей
до 0,6	до 0,1	до 0,1	3,5 - 5,3	до 0,05	86,45 - 90,9	5,3 - 6,8	до 0,3	до 0,2	до 0,015	0,3

Таблица 2-Механические свойства при  $t = 20^{\circ}\text{C}$  сплава ВТ6

Сортамент	$s_{\sigma}$	$s_T$	$\delta$	$\varphi$	$KCU$	Термообработка
	МПа	МПа	%	%	кДж/м <sup>2</sup>	-
Лист отожженный, ГОСТ 22178	885		8			-
Пруток, повышенного качества, ГОСТ 26492	835-1050		6-10	20-30	300-400	Отжиг
Штамповка	950-1100		10-13	35-60	400-800	Отжиг

Обозначения в таблице:

$s_{\sigma}$ -предел кратковременной прочности, [МПа];

$s_T$ -предел пропорциональности (предел текучести для остаточной деформации), [МПа]

$\delta$ -относительное удлинение при разрыве, [%];

$\varphi$ -относительное сужение, [%];

$KCU$ -ударная вязкость, [кДж/м<sup>2</sup>].

Сплав ВТ6 благодаря легирующим добавкам имеет очень высокое качество. В химический состав сплава входит алюминий, который благоприятно влияет на прочность, измельчая зерно стали, повышает жаростойкость сплава, а также ванадий, который повышает, пластичность, вязкость, улучшает структуру и способствует закаливанию.

**Заключение.** В работе рассмотрены конструктивные особенности, проанализированы условия эксплуатации лопаток последних ступеней части низкого давления турбины К-1200-6,8/50 и определен комплекс необходимых

свойств на основании чего был обоснован выбор титанового сплава ВТ-6 для изготовления лопаток последних ступеней части низкого давления турбины К-1200-6,8/50.

### Литература

1. Атомные электрические станции [Электронный ресурс]: учебно-методический комплекс для студентов специальности 1-43 01 08 "Паротурбинные установки атомных электрических станций" / Белорусский национальный технический университет, Кафедра "Тепловые электрические станции"; сост.: А.В. Седнин, Н.Б. Карницкий. – Минск: БНТУ, 2017.
2. Трухний А.Д. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: Учебное пособие для вузов / А.Д. Трухний, Б.В. Ломакин. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 540 с.
3. Лисянский А.С. Современные быстроходные и тихоходные паровые турбины / А.С. Лисянский и др. ОАО «Силовые машины», Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=2330>. – Дата доступа: 21.04.2020.
4. ГОСТ 34497-18. Лопатки паровых турбин. Основные требования к замене [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=0&month=4&year=2019&search=&id=232652> – Дата доступа: 07.05.2020.
5. ГОСТ 19807-91 Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gost.donses.ru/Data/281/28149.pdf>. – Дата доступа: 07.05.2020.